

文章编号:1001-5078(2024)08-1272-05

· 红外技术及应用 ·

一种变焦红外成像测温方法

李科¹, 朱金华², 邵先军³, 孙子林¹, 姜凯华³

(1. 天津航技术物理研究所, 天津 300308; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310014;

3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要:以适合大风、高温等极端天气条件下使用的固定安装式变焦测温热像仪为背景, 针对连续变焦热像仪的测温问题, 提出了一种变焦红外成像测温方法, 在文中给出的定焦热像仪工程测温方法基础上, 扩展了焦距维度, 构建了变焦热像仪测温的多项式模型, 并通过最优化方法计算反演参数, 从而得到不同焦距时的测温结果, 进一步给出了变焦测温时的数据标定方法。基于高精度黑体对自主研发的变焦热像仪进行了数据标定, 分析了不同焦距时的测温精度, 并进行了实验室环境和户外环境的观测试验。试验结果表明, 不同焦距都可获得高精度的测温结果, 达到国标要求的 ± 2 °C精度。该项成果可以在各型变焦热像仪上推广应用, 提高对高压线类远距离目标的测温精度。

关键词: 红外成像; 连续变焦; 数据标定; 测温

中图分类号: TN219; TH74 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.08.014

Temperature measurement method based on zoom infrared imaging

LI Ke¹, ZHU Jin-hua², SHAO Xian-jun³, SUN Zi-lin¹, JIANG Kai-hua³

(1. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308; 2. State Grid Zhejiang, Hangzhou 310014, China;

3. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: A zoom infrared imaging temperature measurement method is proposed in the context of a fixed-mounted zoom temperature measurement thermal imaging camera suitable for use in extreme weather conditions, such as high winds and high temperatures, in order to address the temperature measurement problems of a continuous zoom thermal imaging camera. Based on the engineering temperature measurement method of fixed focus thermal imagers provided in the article, the focal length dimension is expanded to construct a polynomial model for temperature measurement of zoom thermal imagers, and the inversion parameters are calculated through optimization methods to obtain temperature measurement results at different focal lengths. Furthermore, a data calibration method for zoom temperature measurement is provided. A self-developed zoom thermal imager is calibrated based on high-precision blackbody data, and the temperature measurement accuracy at different focal lengths is analyzed. Observation experiments are conducted in both laboratory and outdoor environments. The experimental results show that high-precision temperature measurement results can be obtained with different focal lengths, reaching the ± 2 °C accuracy required by the national standard. This achievement can be promoted and applied to various types of zoom thermal imagers, improving the temperature measurement accuracy for long-distance targets such as high-voltage lines.

Keywords: infrared imaging; continuous zoom; data calibration; temperature measurement

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (No. 5500-202119489A-0-5-ZN) 资助。

作者简介: 李科 (1984 -), 男, 博士, 主要研究方向为红外成像技术、红外辐射测量技术。E-mail: likesea2003@163.com

收稿日期: 2023-11-04

1 引言

红外测温热像仪通常采用定焦光学镜头,便于标定和辐射反演,视场大,可监测范围大,但是由于焦距较短,镜头口径小,只能在较近距离测量目标温度,测量距离通常在 20 m 左右^[1-2]。由于视场大、空间分辨率低,造成目标在热像仪中的像素数目过少,对远距离目标的测温准确度较低^[3-5]。

近年来,连续变焦红外热像仪发展迅速,入瞳口径大,长焦距时可保证对远距离小目标有较好的观察效果,短焦距也可对近距离目标清晰成像,且焦距可在长焦和短焦之间连续变化,在一定范围获得对目标的最佳观察效果^[6]。该类设备通过适当的加固设计,防风沙雨雪,可固定安装在塔架上,实现长期实时监测。

但是,传统的测温技术都是针对于定焦热像仪开展研究工作,发展较为成熟。但是定焦热像仪采用大视场时仅能监测近距离目标,使用小视场时仅能监测远距离目标,两者不能兼顾。研究变焦测温技术,可以给连续变焦热像仪赋予新功能,在目标特性研究、远距离输电线测温等领域具有重要应用意义。

2 红外测温基本原理

根据普朗克定律,一切高于绝对零度的物体都在不停向外辐射能量。红外测温技术就是依靠接收被测物体表面发射的中波或长波红外辐射来确定其辐射温度。

2.1 红外测温典型模型^[7]

实际测量时,热像仪接收到的有效辐射包括目标自身辐射、环境反射辐射和大气辐射三部分。

对于不透明的物体,被测物体表面的辐射亮度为:

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_0) + (1 - \alpha_{\lambda}) L_{b\lambda}(T_u) \quad (1)$$

式中,第一部分为表面光谱辐亮度;第二部分为反射的环境光谱辐亮度; T_0 为被测物体表面温度; T_u 为环境温度; ε_{λ} 为表面辐射率; α_{λ} 为表面对环境辐射的吸收率。

作用于热像仪入瞳的辐射照度为:

$$E_{\lambda} = A_0 d^{-2} (\tau_{\lambda} L_{\lambda} + \varepsilon_{a\lambda} L_{b\lambda} T_a) \quad (2)$$

式中, A_0 为热像仪最小空间张角对应目标的可视面积; d 为该目标到测量仪器的距离; τ_{λ} 为大气透过率; $\varepsilon_{a\lambda}$ 为大气辐射率。

则热像仪接收到的与辐射功率相应的信号电压 V_s 如式:

$$V_s = A_R \int \tau_{o\lambda} E_{\lambda} R d_{\lambda} \quad (3)$$

其中 $\tau_{o\lambda}$ 为光学系统透过率。从公式(3)可以看出,热像仪接收到的电压与目标的温度呈一一对应关系,可以据此反演场景的辐射温度。

2.2 非制冷红外测温工程模型

在工程应用中,通常对公式(3)进行简化。以非制冷红外热像仪为例,其工程化的高精度测温公式通常如式所示:

$$T_{fit} = a_1 + a_2 u + a_3 u^2 \quad (4)$$

式(4)中, a_1 、 a_2 和 a_3 分别为均值温度拟合二阶曲线系数; u 为图像均值; T_{fit} 为曲线拟合测温输出,在非制冷红外热像仪处于稳定工作状态时,该式表征了图像均值与被测温度之间的数学关系。将灰度均值与黑体温度逐点绘制曲线,如图 1 所示。采用二阶曲线拟合温度与灰度输出的关系,得到公式(4)中的 a_1 、 a_2 和 a_3 。

通过公式(4)可以计算出经过均值温度曲线拟合后某一灰度均值下的测量温度。

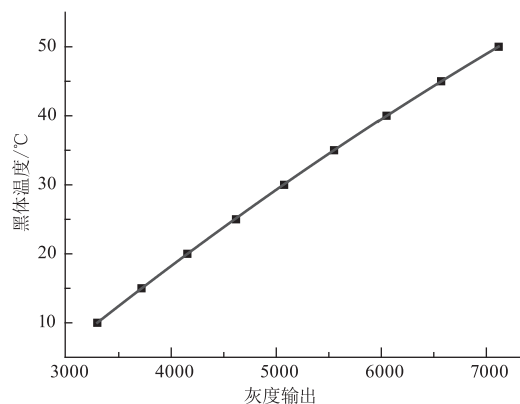


图1 灰度输出与黑体温度曲线

Fig. 1 Grey value and blackbody temperature curve

3 变焦红外成像测温方法

与定焦热像仪不同,变焦热像仪的焦距可以改变,仍使用定焦热像仪测温方法会存在较大的误差,特别是一些变倍比较大的变焦热像仪,在短焦距和长焦距之间会存在 $F/\#$ 数变化,也就是说入瞳能量会有改变,从测温原理上来讲,直接使用公式(4)方法就是不准确的。

从数学上看,变焦热像仪测温原理相当于在定焦热像仪测温原理公式基础上额外增加了一个焦距

f 维度。据此,借鉴公式(4),本文提出如公式(5)所示的测温模型。该模型共有6个参数, a_1 、 a_2 至 a_6 , u 与公式(4)一致,为图像均值。考虑到非线性因素,结合相关试验,对焦距 f 参量使用了二次模型。通过标定过程可以获得 a_1 、 a_2 至 a_6 参数。

$$T_{fit} = a_1 u^2 + a_2 u + a_3 f^2 + a_4 f + a_5 u f + a_6 \quad (5)$$

工程应用过程,由于非制冷焦平面探测器存在空间固定图案噪声(通常称非均匀性),需要对探测器获得的待反演测温原始图像 p_o 进行一次两点非均匀性校正,得到校正后的图像 p_c , k_{ij} 和 b_{ij} 为两点校正系数,本文不再详述。

$$p_c(i, j) = k_{ij} p_o(i, j) + b_{ij} \quad (6)$$

通常应用图像 p_c 中各点的像素值 $p_c(i, j)$ 反演该点温度,具体表述如式:

$$T_{fit}(i, j) = a_1 [p_c(i, j)]^2 + a_2 p_c(i, j) + a_3 f^2 + a_4 f + a_5 p_c(i, j) f + a_6 \quad (7)$$

温度测量时焦平面退化造成的不同像素点测温差异,在具体应用过程中,测温前通常使用热像仪内部快门进行一次单点补偿,其原理如公式(8)所示。其中, u_s 为挡板遮挡后所获取图像 p_s 的均值, $p_s(i, j)$ 为图像中 (i, j) 坐标的像素值, M 为图像的行数, N 为图像的列数。将 $p'_t(i, j)$ 代入到公式(7)对应位置,以提高测温精度。

$$\Delta b_{ij} = u_s - p_s(i, j) \quad (8)$$

$$u_s = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p_s(i, j) \quad (9)$$

$$p'_t(i, j) = p_t(i, j) + \Delta b_{ij} \quad (10)$$

4 变焦测温标定过程

变焦热像仪的标定过程与定焦热像仪类似,在常温时使用面源黑体进行数据标定,黑体面应能完全覆盖镜头前端面,布局如图2所示,为避免环境干扰,热像仪可尽量靠近黑体。

在标定过程中,首先将变焦热像仪开机,稳定运行30 min,使变焦热像仪基本达到热平衡。

热像仪达到热平衡后,根据所需的测温范围第一步,设定黑体的初始温度 T_0 ,将变焦热像仪调到短焦距 f_0 ,采集不少于20帧红外图像,以便于进行时域滤波处理,去除干扰噪声。第二步,调节变焦热像仪调到短焦距 f_1 ,采集不少于20帧红外图像。重复第二步,直到在温度 T_0 下采集完所有焦距点,推荐不少于7个焦距点。

此后,将黑体温度设置为 T_1 ($T_1 = T_0 + \Delta T_b$,推荐值为10℃),重复第二步,直到在温度 T_1 下采集完所有焦距点。

以 ΔT_b 为黑体温度设定增量,重复进行上述过程,直到覆盖所有被测温度。

进行数据处理时,以图像均值作为 u ,根据采样时记录的焦距值 f 和黑体温度值 T ,采用最小二乘法计算出参数 a_1 、 a_2 、 \dots 、 a_6 。

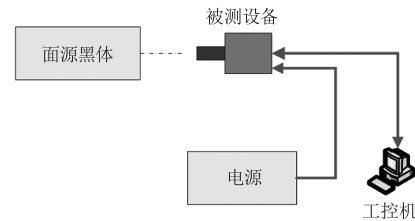


图2 数据标定示意图

Fig. 2 Data calibration

5 实验验证

本项目工程样机如图3所示。采用 640×512 规模非制冷探测器,像元尺寸 $15 \mu\text{m}$,变焦镜头焦距可在30~180 mm范围内无缝调节。采用直流12 V电源适配器供电,整机功耗不大于10 W。外壳进行了加固设计,采用密封航插,具备防风沙雨雪雾能力,通信接口采用千兆网通信,可直接传送探测器采集到的原始数据,帧频不低于25 Hz。工程样机的主要参数如表1所示。

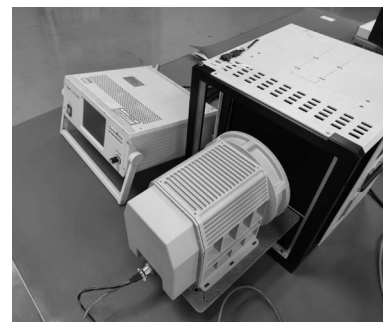


图3 黑体定标实物操作示意图

Fig. 3 Data calibration based on blackbody

表1 变焦热像仪主要参数

Tab. 1 The technical parameters of zoom infrared imaging

工作波段/ μm	阵列规模	像元尺寸/ μm	焦距/mm	帧频/Hz	功耗/W
8~12	640×512	15	30~180	25	10

依据第4节方法,采用高精度面源黑体进行数据标定,设备按照如图3所示安装,黑体温度分辨率

可达0.001℃,每隔10℃取一个标定温度点,每个温度标定点变换7个焦距点并采集数据。数据标定表2给出了焦距固定时,黑体温度与灰度值之间的标定数据。图4给出了标定数据与拟合曲线之间的图表示意,从中可以看出,拟合精度较高,实际点偏离拟合曲线的误差较小。

表2 标定数据表(焦距180mm)

Tab.2 Data calibration($f=180\text{ mm}$)

序号	黑体温度/℃	灰度值
1	10	7797
2	20	7932
3	30	8063
4	40	8227
5	50	8372
6	60	8536
7	80	8921

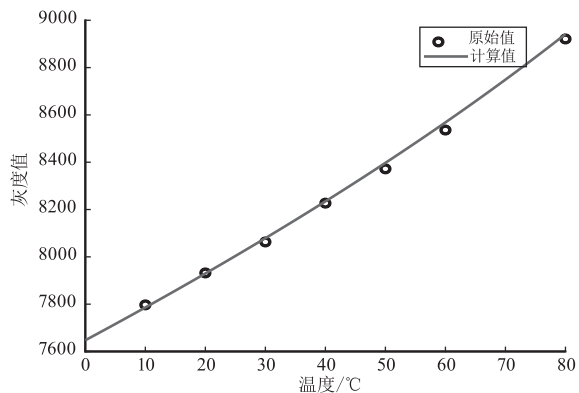


图4 灰度值随黑体温度变化曲线图(固定焦距)

Fig.4 Curve of grayscale value changing with blackbody temperature (fixed focus value)

数据标定表3给出了固定黑体温度时,焦距与灰度值之间的标定数据。图5给出了标定数据与拟合曲线之间的图表示意,从中可以看出,采用文中模型的拟合精度较高,实际点偏离拟合曲线的误差较小。

表4给出了在不同焦距点实际精度测试,黑体温度在30℃,进行变焦测温精度测试,测温误差在±1.5℃以内。图6、图7进行了实际场景测试,其中图6为距离100m时的成像效果,人体手部测温在35.7℃,为距离5m时的成像效果,人体颈部温度在36.3℃。图8是对300m左右距离塔吊成像效果,塔吊的钢丝绳清晰可见,温度比环境温度略高。图9是300m左右距离高压线的及高压线塔的成像效果,高压线温度略高于环境温度。变焦测温热像仪在短焦距和长焦距都获得了较好的结果,特

别是距离较远时,通过长焦距成像可以获得目标更多的像素数量,从而抑制能量损失,提高远距离时的测温精度。

表3 标定数据表(黑体20℃)

Tab.3 Data calibration($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

序号	焦距/mm	灰度值
1	62	7836
2	81	7847
3	112	7865
4	139	7886
5	162	7909
6	180	7932

表4 反演结果数据表(黑体30℃)

Tab.4 Temperature measurement results ($T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

序号	焦距/mm	灰度值	温度/℃
1	62	8101	29.9191
2	84	8097	30.0054
3	112	8090	29.8859
4	139	8082	29.6001
5	161	8074	28.9547
6	179	8063	29.8186

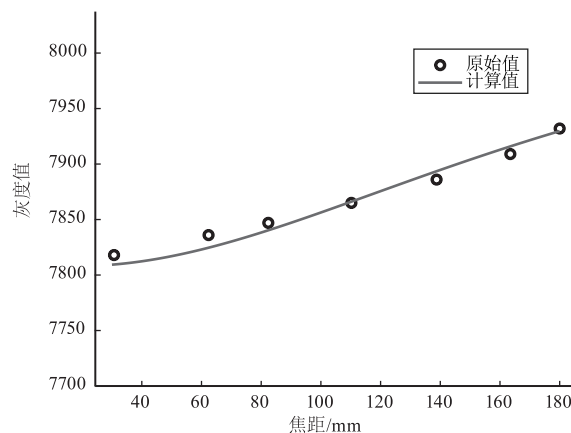


图5 灰度值随焦距变化曲线图(固定黑体温度)

Fig.5 Curve of grayscale value changing with focus value (fixed blackbody temperature)



图6 长焦距成像效果图(100m距离)

Fig.6 Long focus image (100 m)



图7 短焦距成像效果图(5 m距离)

Fig. 7 Short focus image (5 m)

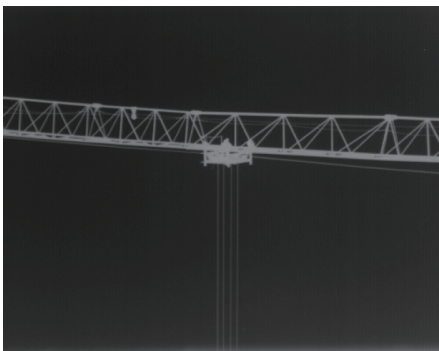


图8 塔吊目标成像效果图(300 m距离)

Fig. 8 Tower crane image (300 m)



图9 高压线成像效果图(300 m距离)

Fig. 9 High voltage line infrared image (300 m)

6 结论

以近年来发展迅速的连续变焦红外成像器为背景,提出了一种基于多项式模型的变焦测温方法,在本文给出的非制冷红外测温工程模型基础上,扩展了一个焦距维度,并通过最小二乘法计算反演参数,从而得到不同焦距时的最佳测温结果。采用自主研发的连续变焦热像仪进行了数据标定,分析了变焦测温效果,开展了测温试验。试验结果表明,以黑体为参考源,使用不同焦距对黑体测温,各焦距之间的测温结果相差在 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,整体测温精度达到国

标要求的 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 指标。相对于定焦测温方法,本文进一步丰富了测温的理论体系,可以给连续变焦成像器赋予新功能,在小目标辐射特性研究、远距离输电线路测温等领域具有重要应用意义。

参考文献:

- [1] Sun Hang. Target acquisition and tracking key technology research of large infrared radiation characteristic measurement device[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
孙航. 大口径红外辐射特性测量设备目标识别与跟踪关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2015.
- [2] 杨立. 红外热成像测温原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [3] Zhang Pugen. Application of infrared imaging detection technology in special equipment inspection[J]. Chemical Equipment Technology, 2023, 44(1): 13 - 16. (in Chinese)
张蒲根. 红外成像检测技术在特种设备检验中的应用研究[J]. 化工装备技术, 2023, 44(1): 13 - 16.
- [4] Zhang Xiaolong, Liu Ying, Sun Qiang. Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision[J]. Chinese Optics, 2012, 5(3): 235 - 241. (in Chinese)
张晓龙, 刘英, 孙强. 高精度非制冷长波红外热像仪的辐射标定[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 235 - 241.
- [5] Chen Yiming. Study on temperature measurement accuracy of infrared thermal imager[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017. (in Chinese)
陈一明. 红外热像仪测温精度的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- [6] Yin Jing, Liu Chunyan, Liu Xu, et al. Design of infrared zoom optical system for straw burning monitoring[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(1): 110 - 114. (in Chinese)
尹晶, 刘春艳, 刘旭, 等. 秸秆焚烧火情监察红外变焦距光学系统设计[J]. 激光与红外, 2022, 52(1): 110 - 114.
- [7] Lu Zifeng, Pan Yulong, Wang Xuejin, et al. Influence of object-system distance on accuracy of temperature measurement with IR system[J]. Infrared Technology, 2008, 30(5), 271 - 278. (in Chinese)
陆子凤, 潘玉龙, 王学进, 等. 目标到测试系统距离对红外测温精度的影响[J]. 红外技术, 2008, 30(5), 271 - 278.